

MÉTODO DE DESEMBEBIDO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE AMPLIFICADORES DIFERENCIALES USANDO BALUNS PASIVOS

Ó. García Pérez, V. González Posadas, L. E. García Muñoz y D. Segovia Vargas

ogarpe@tsc.uc3m.es

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad Carlos III de Madrid, 28911 Leganés, Madrid

Resumen- This paper analyses the noise and gain measurement of microwave differential amplifiers using two passive baluns. A model of the baluns that includes potential losses and unbalances has been considered. This analysis allows de-embedding actual performance of the differential device from the single-ended measurements of the two-port cascaded system and the baluns. The method has been validated with measured results from a fully-differential amplifier prototype.

I. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el uso de amplificadores diferenciales en electrónica de baja frecuencia ha sido bastante común. Más recientemente, los ingenieros han trabajado tratando de aumentar el rango de frecuencias de dichos dispositivos, con el fin de explotar sus características también a frecuencias de microondas. Una de las potenciales aplicaciones en las que se ha propuesto el uso de amplificadores diferenciales a frecuencias de microondas es en el diseño de los arrays de antenas activas para el futuro radiotelescopio SKA (*Square Kilometre Array*) [1]. En este array, las antenas de tipo Vivaldi proporcionan una señal de salida balanceada. Por tanto, el uso de amplificadores diferenciales de bajo ruido directamente conectados a las antenas parece la solución más adecuada, ya que se evitarían las pérdidas (y el consiguiente incremento de ruido) que introduciría un balun pasivo entre la antena y el amplificador. Para este tipo de aplicaciones, es necesario el uso de métodos de medida diferenciales lo suficientemente precisos como para caracterizar con garantías el bajo nivel de ruido de dichos amplificadores diferenciales. Sin embargo, una de las limitaciones de los amplificadores diferenciales es que su caracterización en alta frecuencia no es trivial [2].

En el caso de los parámetros S, el uso de los parámetros en modo mixto permite caracterizar un dispositivo diferencial a partir de excitaciones en modo común y/o diferencial entre los pares de puertos de entrada y de salida. Estos parámetros S en modo mixto se pueden obtener fácilmente a partir de los parámetros S convencionales [3] o directamente medidos en un analizador de redes multi-puerto [4]. Sin embargo, la medida de la figura de ruido en amplificadores diferenciales aún sigue siendo un reto, y varios métodos han sido propuestos en la literatura durante los últimos años. En [5] se propone un método basado en una carga diferencial sometida a dos temperaturas diferentes. Este método requiere enfriar la carga usando nitrógeno líquido, lo cual puede resultar problemático en algunos casos. Además, aunque las cargas puramente resistivas son fáciles de implementar, sintetizar una impedancia de carga compleja arbitraria es más difícil. En [6],

un método basado en medidas entre los diferentes pares de puertos se utiliza para determinar la figura de ruido y la ganancia de un amplificador diferencial. La ventaja de este método es que sólo requiere un equipo convencional de medida de figura de ruido y ganancia. El problema viene para la medida con impedancias de fuente variables, ya que esto requeriría el uso de un sintonizador de impedancias pareado, con el fin de respetar la (anti-)simetría del circuito [7].

En la actualidad, el método más directo para caracterizar un amplificador diferencial es mediante el uso de baluns pasivos. Esto permite convertir el dispositivo diferencial de cuatro puertos a uno idealmente equivalente de dos puertos, con excitaciones en modo diferencial en los puertos de entrada y de salida. Una vez que el dispositivo se convierte a un amplificador de dos puertos, éste puede medirse directamente en un analizador de redes o de figura de ruido convencional, e incluso es posible obtener los círculos de ruido y de ganancia utilizando sintonizadores de impedancia convencionales [7],[8]. La desventaja es que los baluns van a influir en la medida, por lo que es necesario definir un método de desembibido para obtener las características del amplificador a partir de la medida del sistema en cascada formado por el amplificador y los baluns. Los métodos de desembibido propuestos en la literatura asumen un modelo de balun con pérdidas iguales en cada una de las dos ramas, y un desfase ideal de 180° entre ambas salidas, lo cual puede no ajustarse a lo que se tiene en la práctica [9].

Este trabajo analiza la medida de amplificadores diferenciales con baluns, pero teniendo en cuenta un modelo más completo de los baluns. En este caso se tienen en cuenta los posibles efectos debidos a desbalanceos, tanto en fase como en amplitud, entre ambas ramas de los baluns. Al incluir dichos desbalanceos, ya no se tiene en cuenta únicamente la propagación de señales puras en modo diferencial, como ocurre en [9], sino el efecto combinado de señales en modo diferencial y en modo común. En la práctica, este análisis se puede utilizar para desembiber la figura de ruido y la ganancia de un amplificador diferencial a partir de la medida del sistema en cascada de dos puertos. Por último, se han obtenido algunos resultados experimentales para validar el análisis teórico.

II. ANÁLISIS TEÓRICO

El esquema de medida que será analizado en este trabajo se muestra en la Fig. 1. Los baluns de entrada y de salida se indican como $B1$ y $B2$, y el amplificador se denota por A . En

el caso ideal, el balun de entrada $B1$ divide por igual la señal procedente del puerto 1 hacia los puertos 2 y 3, con una diferencia de fase de 180° entre ambos puertos. El comportamiento de $B2$ es equivalente, pero combinando las señales de los puertos 2 y 3. En el caso ideal, la figura de ruido y ganancia del amplificador diferencial aislado (con excitaciones diferenciales) son iguales a la figura de ruido y ganancia del sistema en cascada mostrado en la Fig. 1 [9].

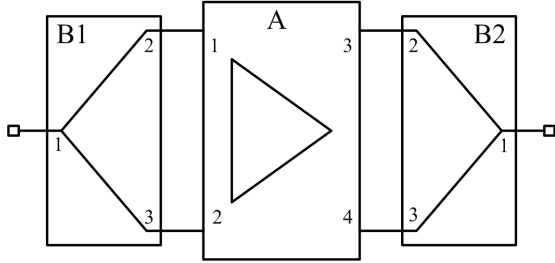


Fig. 1. Esquema de medida.

Existen dos tipos de amplificadores diferenciales: el balanceado y el par diferencial [2] (Fig. 2). El primero se basa en dos amplificadores independientes funcionando en paralelo. El segundo se basa en dos amplificadores en los que las fuentes de los transistores se han conectado a una fuente de corriente común. Su funcionamiento es equivalente cuando son excitados con señales puramente diferenciales. La diferencia es la forma en que amplifican las señales en modo común. En el caso del amplificador balanceado, éste amplifica por igual las señales en modo común y en modo diferencial. Por su parte, el par diferencial sólo amplifica las señales en modo diferencial, mientras que las señales en modo común son disipadas en la estructura. En cuanto a la relación de rechazo en modo común (CMRR), el primer caso proporciona $CMRR=1$, mientras que el segundo caso proporciona idealmente $CMRR=\infty$. Dado que vamos a considerar un modelo de balun con desbalances entre ambas ramas, es posible la propagación de señales en ambos modos (común y diferencial), por lo que se deben analizar por separado ambas topologías diferenciales.

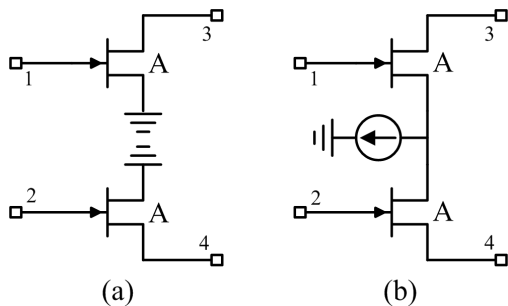


Fig. 2. Esquemas de un amplificador balanceado (a) y un par diferencial (b).

A. Amplificador balanceado

En el caso ideal, los parámetros S del amplificador balanceado se pueden considerar cero, excepto la transmisión entre los puertos 1-3 y 2-4, es decir,

$$s_{31}^A = s_{42}^A = A \quad (1)$$

donde A es la ganancia del amplificador. En el caso de los baluns, se supone que todos los parámetros S son iguales a cero (adaptación en todos los puertos y aislamiento entre los puertos de salida), con excepción de los parámetros de

transmisión entre los puertos 1-2 y 1-3 (pérdidas y desbalances de fase y amplitud arbitrarios), es decir,

$$\begin{aligned} s_{12}^{B1} &= s_{21}^{B1}, \quad s_{13}^{B1} = s_{31}^{B1}, \\ s_{12}^{B2} &= s_{21}^{B2}, \quad s_{13}^{B2} = s_{31}^{B2} \end{aligned} \quad (2)$$

donde los super-índices $B1$ y $B2$ indican los baluns de entrada y de salida respectivamente.

El factor de ruido de un dispositivo de dos puertos se puede escribir como

$$f = \frac{\text{Total noise power at the output}}{\text{Noise power at the output due to the source resistor}} \quad (3)$$

En este caso, la potencia de ruido en el puerto de salida es generada por las contribuciones de la resistencia de fuente, de los dos baluns, y del amplificador. En el caso del balun de entrada, se puede suponer que las dos ramas generan señales de ruido incorreladas [9]. Dado que el factor de ruido de un dispositivo pasivo es igual a sus pérdidas, la densidad espectral de ruido en su salida es kT (W^2/Hz), donde k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura del sistema. Por las ramas 1-2 y 1-3 del balun de entrada, estas densidades de potencia se propagan a la salida a través del amplificador y el balun de salida como

$$\begin{aligned} N_{1-2}^{B1,a} &= kT |s_{31}^A s_{12}^{B2}|^2 \\ N_{1-3}^{B1,a} &= kT |s_{42}^A s_{13}^{B2}|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

donde los subíndices 1-2 y 1-3 indican las ramas correspondientes del balun, el super-índice a denota la topología balanceada y los super-índices $B1$, A y $B2$ denotan el balun de entrada, el amplificador y el balun de salida respectivamente. Los términos en (4) incluyen la contribución combinada de la resistencia de la fuente y el balun de entrada. Para el amplificador balanceado se puede suponer que el ruido generado por cada una de las dos ramas separadas no está correlado. Por definición, la potencia de ruido en la salida de un amplificador es $kTf_A G_A$, donde f_A es el factor de ruido del amplificador y G_A es la ganancia [9]. Para el cálculo de la contribución sólo del amplificador se debe eliminar la contribución de la fuente (es decir, $kT G_A$). Por lo tanto, la potencia de ruido de cada rama del amplificador balanceado se propaga a la salida del sistema como

$$\begin{aligned} N_1^{A,a} &= (kTf_A |s_{31}^A|^2 - kT |s_{31}^A|^2) |s_{12}^{B2}|^2 \\ &= kT(f_A - 1) |s_{31}^A s_{12}^{B2}|^2 \\ N_2^{A,a} &= kT(f_A - 1) |s_{42}^A s_{13}^{B2}|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

donde los subíndices 1 y 2 indican el correspondiente puerto de entrada del amplificador. La densidad espectral de ruido en la salida del balun $B2$ es kT (W^2/Hz). Considerando que dos resistencias de puerto introducen dos señales de ruido independientes por los puertos 2 y 3, el ruido debido únicamente al balun de salida se puede obtener restando la contribución de de estos dos puertos del ruido total a la salida del balun, esto es,

$$\begin{aligned} N^{B2,a} &= kT - kT |s_{12}^{B2}|^2 - kT |s_{13}^{B2}|^2 \\ &= kT \left[1 - \left(|s_{12}^{B2}|^2 + |s_{13}^{B2}|^2 \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Por último, la contribución de ruido de la resistencia de fuente en la salida del sistema se obtiene como

$$N^{S,a} = kT |s_{21}^{B1} s_{31}^A s_{12}^{B2} + s_{31}^{B1} s_{42}^A s_{13}^{B2}|^2 \quad (7)$$

A partir de esta última expresión es posible extraer la

ganancia de potencia del sistema en cascada cuando se utiliza un amplificador balanceado, esto es,

$$G_{casc}^{(a)} = |s_{21}^{B1,A} s_{31}^{A,B2} + s_{31}^{B1,A} s_{42}^{A,B2}|^2 \quad (8)$$

Por último, el factor de ruido del sistema en cascada se puede obtener a partir de (3)-(7) como

$$f_{casc}^{(a)} = \frac{N_{1-2}^{B1,a} + N_{1-3}^{B1,a} + N_1^{A,a} + N_2^{A,a} + N^{B2,a}}{N^{S,a}} \quad (9)$$

$$= \frac{f_A (|s_{31}^{A,B2}|^2 + |s_{42}^{A,B2}|^2) + 1 - (|s_{12}^{B2}|^2 + |s_{13}^{B2}|^2)}{|s_{21}^{B1,A} s_{31}^{A,B2} + s_{31}^{B1,A} s_{42}^{A,B2}|^2}$$

Se puede observar que para el caso de baluns ideales, esto es,

$$s_{21}^{B1} = 1/\sqrt{2}, \quad s_{31}^{B1} = -1/\sqrt{2}, \quad (10)$$

$$s_{12}^{B2} = 1/\sqrt{2}, \quad s_{13}^{B2} = -1/\sqrt{2}$$

la figura de ruido y la ganancia del sistema en cascada es igual al rendimiento del amplificador aislado, es decir,

$$f_{casc} = f_A, \text{ y } G_{casc} = A. \quad (11)$$

B. Amplificador de par diferencial

A diferencia del caso anterior, el par diferencial no puede ser analizado como dos etapas independientes. Así, en el caso ideal, todos los parámetros S del amplificador son cero excepto los parámetros de transmisión entre los puertos de entrada y los puertos de salida, es decir,

$$s_{31}^A = s_{42}^A = A/2, \quad (12)$$

$$s_{32}^A = s_{41}^A = -A/2$$

En este caso, la potencia de ruido presente en una de las entradas del amplificador se propaga a través de las dos salidas. De este modo, el ruido procedente de una rama del balun de entrada se divide en dos caminos en el amplificador y se combina en el balun de salida como

$$N_{1-2}^{B1,b} = kT |s_{31}^{A,B2} + s_{41}^{A,B2}|^2 \quad (13)$$

$$N_{1-3}^{B1,b} = kT |s_{32}^{A,B2} + s_{42}^{A,B2}|^2$$

donde los subíndices 1-2 y 1-3 indican la correspondiente rama del balun. La contribución de ruido del amplificador diferencial se puede calcular suponiendo dos fuentes de ruido independientes en ambos puertos de entrada. Por lo tanto, el ruido generado por cada fuente se propaga a través de las dos salidas del amplificador y, finalmente, se combina en el balun de salida como

$$N_1^{A,b} = kT(f_A - 1) |s_{31}^{A,B2} + s_{41}^{A,B2}|^2 \quad (14)$$

$$N_2^{A,b} = kT(f_A - 1) |s_{32}^{A,B2} + s_{42}^{A,B2}|^2$$

donde los subíndices 1 y 2 indican el correspondiente puerto de entrada del amplificador. Para el balun de salida, el ruido procedente de los puertos 2 y 3 ya no se puede considerar incorrelado en este caso, ya que no hay dos caminos independientes en el esquema. Como en el par diferencial sólo se propagan señales en modo diferencial (la ganancia en modo común es cero), el ruido puede ser modelado como una fuente diferencial conectada entre los puertos 2 y 3. Por tanto, lo que se ha hecho es interpretar el balun de salida como un dispositivo pasivo de dos puertos, con un puerto de entrada diferencial (referido entre los terminales 2 y 3) y un puerto de salida convencional referido a tierra, cuyo parámetro de transmisión s_{sd21} se puede obtener como [3]

$$s_{sd21}^{B2} = (s_{12}^{B2} - s_{13}^{B2})/\sqrt{2} \quad (15)$$

donde los subíndices s y d denotan excitaciones *single-ended* y diferencial en los puertos. Dado que la densidad de potencia de ruido a la salida es kT (W^2/Hz), la contribución únicamente del balun se puede obtener eliminando el ruido generado por dicha fuente diferencial a la entrada del ruido total a la salida, esto es,

$$N^{B2,b} = kT(1 - 0.5 |s_{12}^{B2} - s_{13}^{B2}|^2) \quad (16)$$

Por último, la contribución de ruido de la resistencia de fuente propagada a la salida puede calcularse a partir de la combinación por los diferentes caminos por donde se transmite la señal de la fuente hasta la salida, es decir,

$$N^{S,b} = kT |(s_{21}^{B1,A} s_{31}^{B1,A} s_{12}^{B2} + (s_{21}^{B1,A} + s_{31}^{B1,A}) s_{13}^{B2})|^2 \quad (17)$$

La ganancia del sistema en cascada en este caso se obtiene directamente de (17)

$$G_{casc}^{(b)} = |(s_{21}^{B1,A} s_{31}^{B1,A} s_{12}^{B2} + (s_{21}^{B1,A} + s_{31}^{B1,A}) s_{13}^{B2})|^2 \quad (18)$$

y el correspondiente factor de ruido es

$$f_{casc}^{(b)} = \frac{N_{1-2}^{B1,b} + N_{1-3}^{B1,b} + N_1^{A,b} + N_2^{A,b} + N^{B2,b}}{N^{S,b}} =$$

$$= \frac{f_A (|s_{31}^{A,B2}|^2 + |s_{41}^{A,B2}|^2 + |s_{32}^{A,B2} + s_{42}^{A,B2}|^2) + 1 - 0.5 |s_{12}^{B2} - s_{13}^{B2}|^2}{|(s_{21}^{B1,A} s_{31}^{B1,A} s_{12}^{B2} + (s_{21}^{B1,A} + s_{31}^{B1,A}) s_{13}^{B2})|^2} \quad (19)$$

III. RESULTADOS MEDIDOS

Esta sección muestra los resultados experimentales obtenidos con un prototipo de amplificador basado en un par diferencial. La placa del circuito del amplificador diferencial se muestra en la Fig. 3. Dicho diseño se basa en dos amplificadores monolíticos, modelo ERA-5 + de *Minicircuits*. Las fuentes de los dos transistores se han conectado a un punto común, en el que se ha conectado una bobina conectada a tierra. Esta bobina actúa como una fuente de corriente.

Los baluns utilizados para la medida se basan en una topología de híbrido *rat-race*, que se puede utilizar como un divisor de potencia de 3 dB y con una diferencia de fase de 180°. La frecuencia central de los baluns es de 2100 MHz. La medida se ha realizado entre 1600 y 2600 MHz, que es el rango de frecuencias en el que los parámetros de reflexión y de aislamiento de los baluns son suficientemente bajos (en este caso son inferiores a -15 dB). Los parámetros S medidos de los dos baluns se muestran en la Fig. 4. Se puede observar que el funcionamiento es más cercano al ideal (es decir, transmisión de -3 dB y diferencia de fase de 180°) en la frecuencia central, pero se degrada en los bordes de la banda.

El proceso de caracterización del amplificador diferencial se describe a continuación. En primer lugar, se han medido los parámetros S de los baluns utilizando un analizador de redes convencional. Posteriormente, el esquema de medida con el amplificador y los baluns es el que se muestra en la Fig. 1. Los valores de ganancia y de figura de ruido del sistema en cascada (G_{casc} y f_{casc}) se han medido utilizando un equipo de medida de ruido y de ganancia convencional. El valor del parámetro A se puede obtener a partir de los valores medidos de G_{casc} y los parámetros S de los baluns, y haciendo uso de las expresiones (12) y (18). Este valor de A denota la ganancia desemejada del amplificador diferencial. Cabe señalar que, en el caso de un amplificador balanceado, se utilizarían las expresiones (1) y (8) para extraer ese parámetro. Por último, el

valor del factor de ruido desembibido del amplificador f_A se obtiene a partir de los valores medidos de f_{casc} , A y los parámetros S de los baluns, y haciendo uso de (12) y (19). En el caso del amplificador balanceado se utilizarían las expresiones (1) y (9) en su lugar.

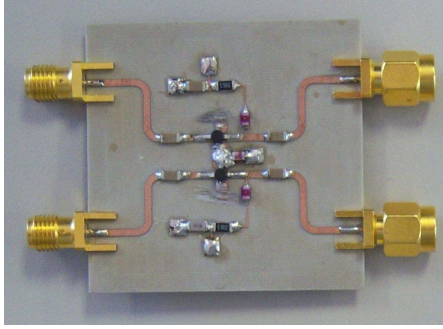


Fig. 3. Placa del circuito del amplificador diferencial implementado.

Las curvas de los diferentes parámetros medidos están representadas en la Fig. 5. Las líneas continuas representan comportamiento del amplificador monolítico de dos puertos ERA-5+. Este amplificador es el que se ha utilizado en cada una de las ramas del amplificador diferencial implementado, e idealmente debería dar la misma figura de ruido y la misma ganancia que el amplificador diferencial. Por tanto, este valor se ha utilizado como referencia para medir la exactitud del proceso de desembibido. Las curvas punteadas representan la medida del sistema en cascada que se muestra en la Fig. 1. Por último, las líneas discontinuas representan los resultados del amplificador diferencial después del proceso de desembibido, utilizando el método descrito en este artículo, y comparando

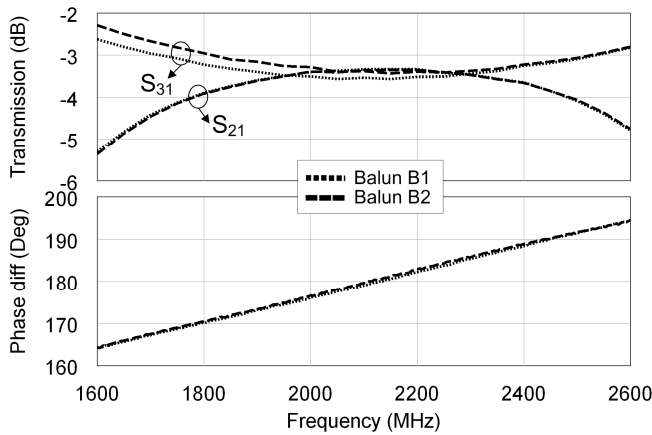


Fig. 4. Parámetros S medidos de los baluns.

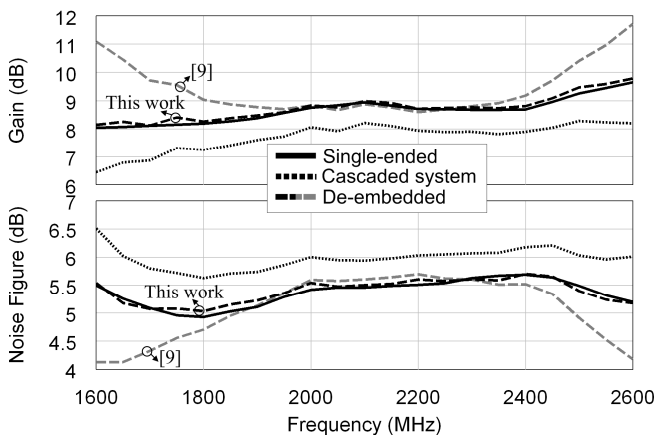


Fig. 5. Resultados de la medida de figura de ruido y ganancia del amplificador de dos puertos (*single-ended*), del sistema en cascada con el amplificador y los dos baluns, y del amplificador diferencial usando el método propuesto en este trabajo y el método en [9].

con el resultado obtenido con el método que se propone en [9]. En dicha figura se puede observar que los resultados obtenidos con el presente método se ajustan bastante mejor a la curva de referencia, incluso en los extremos de la banda en los que los desbalances y las pérdidas en el balun son mayores. En el caso del método presentado en [9], ese presenta resultados similares en el centro de la banda, pero el error es sensiblemente mayor en los extremos de la banda. Esto es lógico, ya que el método propuesto en [9] no tiene en cuenta los desbalances en el balun. Por tanto, el presente método es inherentemente más preciso, ya que no solo considera las pérdidas (como en [9]), sino que también considera los desbalances de fase y amplitud de los baluns.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un método mejorado para el desembibido de la figura de ruido de amplificadores diferenciales medidos utilizando baluns pasivos. Para ello, se ha realizado un análisis teórico en el que se ha considerado un modelo general de los baluns, en el cual se tienen cuenta posibles pérdidas y desbalances entre las ramas, lo que en la práctica permite mejorar la precisión de los resultados. Este método ha sido validado a partir de los resultados experimentales con un prototipo de amplificador diferencial con el que se han obtenido resultados satisfactorios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el MEC con el proyecto TEC2009-14525-C02-01, y por el proyecto europeo *Square Kilometre Array Design Studies* (SKADS).

REFERENCIAS

- [1] P. E. Dewdney, P. J. Hall, R. T. Schilizzi, and T. J. W. Lazio, "The Square Kilometre Array," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 8, pp. 1482-1496, Aug. 2009.
- [2] W. R. Eisenstadt, B. Stengel, and B. M. Thomson, *Microwave Differential Circuit Design Using Mixed-Mode S-Parameters*. Artech House Publishing, Apr. 2006.
- [3] D. E. Bockelman, and W. R. Eisenstadt, "Combined differential and common-mode scattering parameters: theory and simulation," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 43, no. 7, pp. 1530-1539, Jul. 1995.
- [4] D. E. Bockelman, and W. R. Eisenstadt, "Pure-mode network analyzer for on-wafer measurements of mixed-mode S-parameters of differential circuits," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 45, no. 7, pp. 1071-1077, Jul. 1997.
- [5] J. Morawietz, R. H. Witvers, J. G. B. Vaate, and E. E. M. Woestenburger, "Noise characterization of ultra low noise differential amplifiers for next generation radiotelescopes," *European Microw. Conf.*, Munich, pp. 1570-1573, Oct. 2007.
- [6] L. Belostotski, and J. W. Haslett, "A technique for differential noise figure measurement of differential LNAs," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 7, pp. 1298-1303, Jul. 2008.
- [7] O. Garcia-Perez, L. E. Garcia-Muñoz, V. Gonzalez-Posadas, and D. Segovia-Vargas, "Source-pull characterization of differential active antennas for radioastronomy," *European Wireless Tech. Conf.*, Rome, pp. 84-87, Sep. 2009.
- [8] O. Garcia-Perez, D. Segovia-Vargas, L. E. Garcia-Muñoz, J. L. Jimenez-Martin, and V. Gonzalez-Posadas, "Broadband differential low-noise amplifier for active differential arrays," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 59, no. 1, pp. 108-115, Jan. 2011.
- [9] A. Abidi, and J. C. Leete, "De-embedding the noise figure of differential amplifiers," *IEEE Journ. Solid-State Circ.*, vol. 34, no. 6, pp. 882-885, Jun. 1999.